



あかり衛星を用いた 低重元素量系外銀河における 原始星と星間物質の研究

下西 隆

新潟大学 超域学術院 / 理学部
(JSPS卓越研究員)

第12回宇宙科学奨励賞(宇宙理学分野)受賞記念オンライン講演会

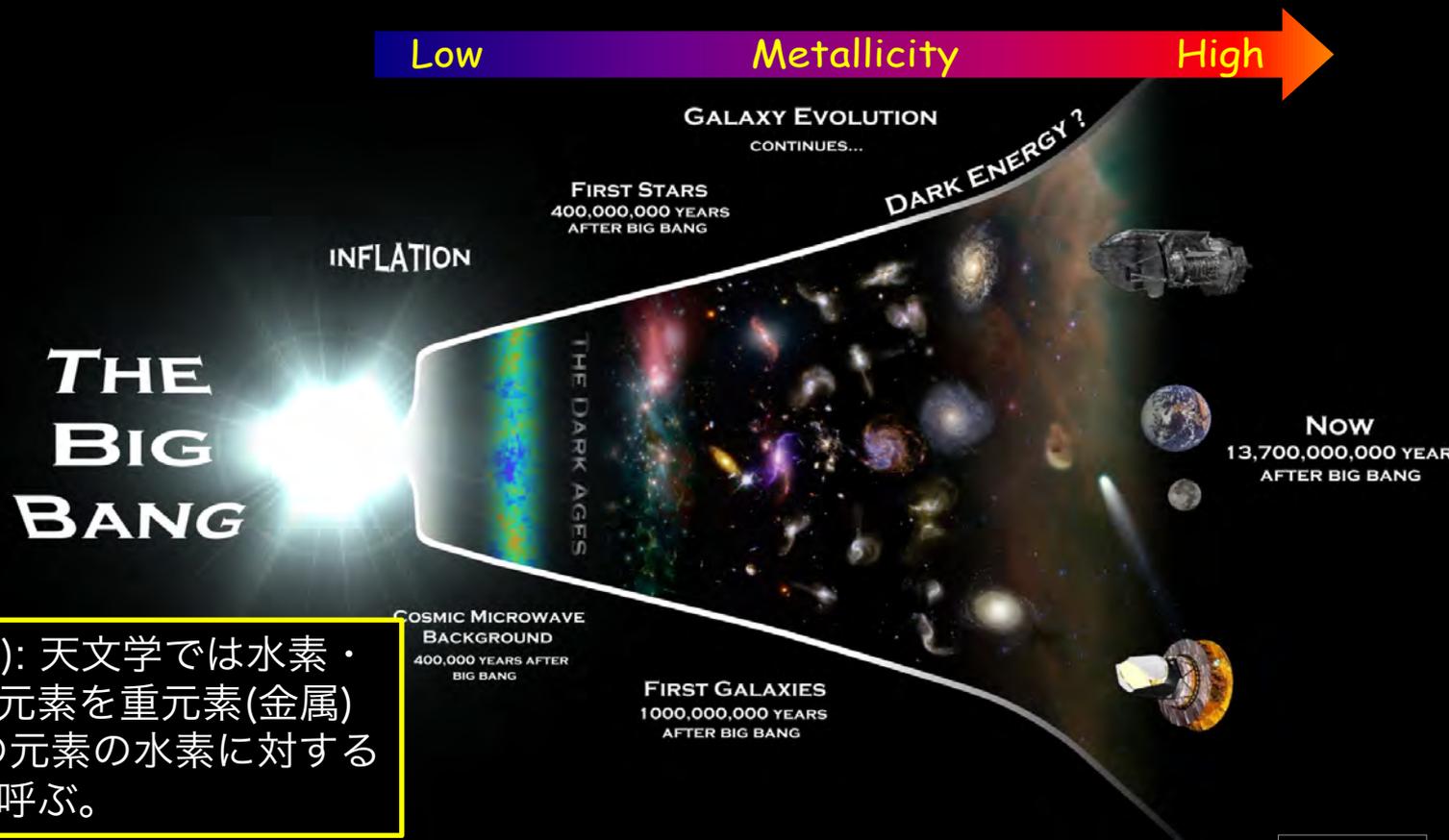
2021.4.27

謝辞: 多くの方々にお世話になりました

- 本奨励賞にご推薦いただいた相川祐理先生
- 大学院時代からご指導いただいている尾中敬先生
- あかりプロジェクトに関わった皆さま
- 国内・国外の共同研究者の皆さま
- 南半球の大型望遠鏡プロジェクトの関係者の皆さま
- 研究室の先輩・後輩、同期の研究者の皆さま
- 文部科学省 科学技術人材育成コンソーシアムと日本学術振興会の皆さま
- 宇宙科学振興会の関係者の皆さまと選考委員の皆さま

低重元素量の面白さ

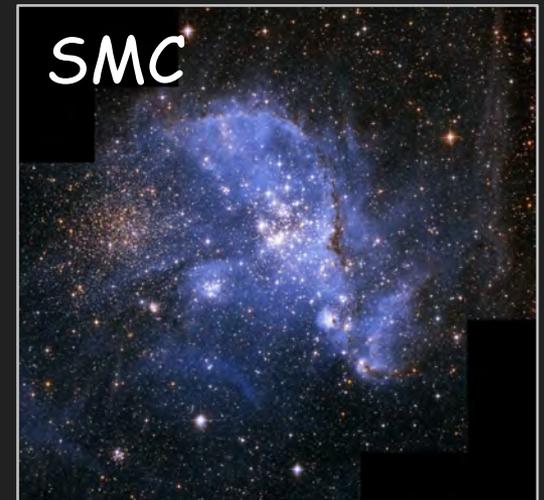
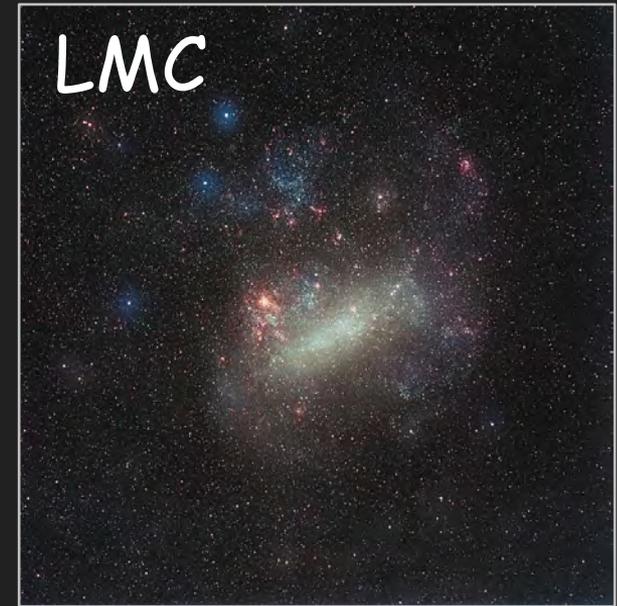
- 星や惑星の材料となる物質の化学組成はどれほどの多様性を持つのか？
- 現在の太陽系で見られる生命や物質の化学的多様性は、過去の星・惑星系でも存在可能だったのだろうか？



¹重元素量 (金属量): 天文学では水素・ヘリウムより重い元素を重元素(金属)と呼び、それらの元素の水素に対する割合を重元素量と呼ぶ。

大マゼラン雲 (LMC) ・ 小マゼラン雲 (SMC)

- 最も近い星形成銀河
 - 距離 $_{LMC/SMC} = 50/60 \text{ kpc}^1$ ($1'' \sim 0.3 \text{ pc}$)
 - LMCの場合ほぼface-on ($i \sim 35^\circ$)
 - 金属量が低い³
 - 太陽に比べて, LMC : $\sim 1/2-1/3$,
SMC : $\sim 1/5-1/10$
- => 低金属量環境の星形成・星間物質・星間現象を研究する上で最適な銀河



¹Alves, 2004

²Westerlund, 1990

³Luck et al. 1998

Fig.2 Optical images of the LMC and SMC
[Ref. E. Slawik (LMC), A. Nota/ESA, STScI (SMC)]

宇宙の時間進化、星形成率、金属量

- 過去の宇宙は、現在よりも星形成活動が活発で、かつ金属量も低かった
=> 現在の天の川銀河とは異なる物質進化はあったのか？

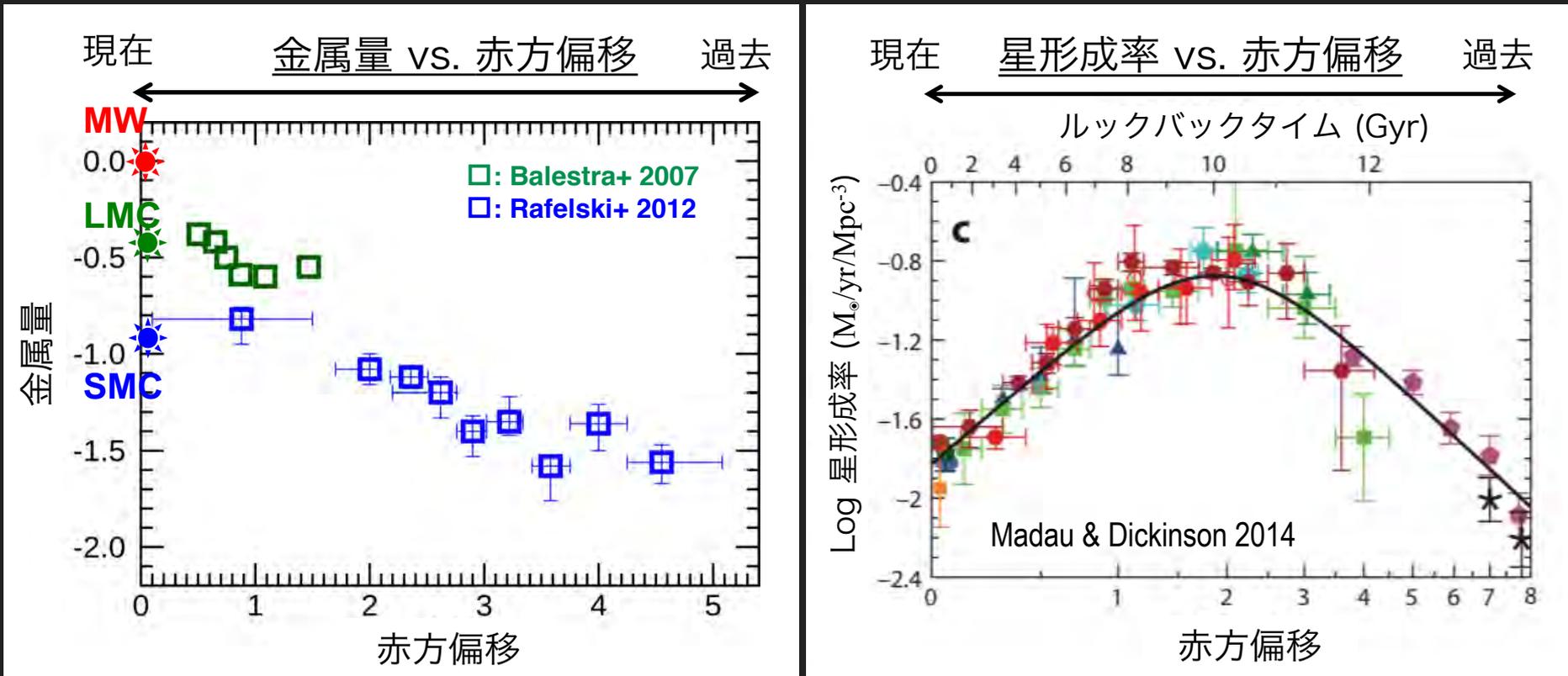
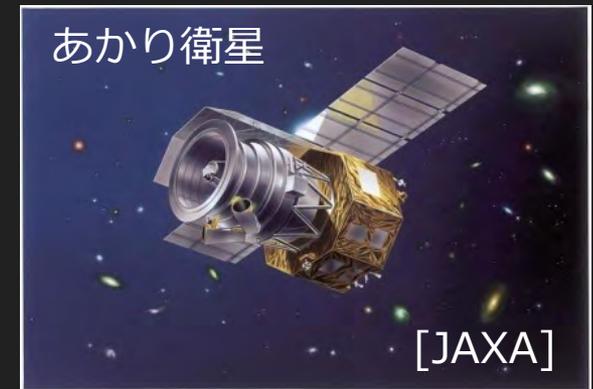


Fig.3 (Left) Redshift vs. SFR relation. Balestra+ 2007 is based on Chandra X-ray observations of Fe lines in low-z intra-galactic medium, whereas Rafelski+ 2012 is based on Keck NIR spectroscopy of Fe/Si/S absorption lines in high-z galaxies. (Right) Redshift vs. metallicity relation [Madau & Dickinson+ 2014]

赤外線天文衛星「あかり」 (ASTRO-F)

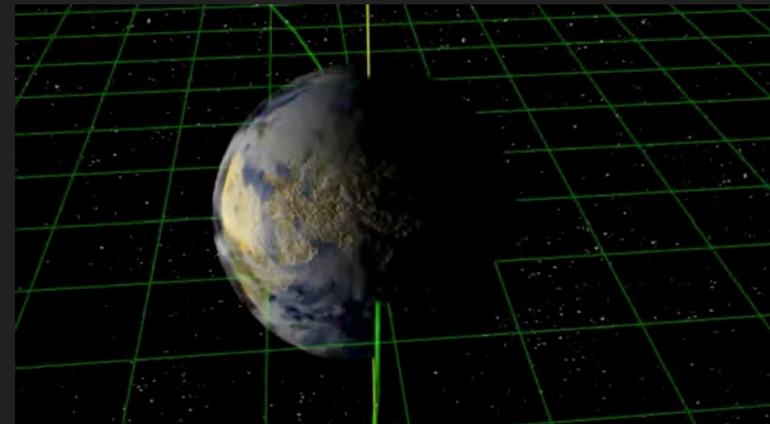
- JAXAを中心に欧州・韓国が参加した国際プロジェクト¹
- 68.5センチ冷却望遠鏡 (約-270度の望遠鏡)
 - 近・中間赤外線を観測するIRC²
(InfraRed Camera, 2-26ミクロン)
 - 遠赤外線を観測するFIS³
(Far-Infrared Surveyor, 50-180ミクロン)
- 2006年2月打ち上げ, 2011年11月運用終了



「科学目標」

- ✓ 宇宙の赤外線の地図を作る
(全天赤外線マッピング)
- ✓ 銀河、星、惑星の形成の様子を明らかにする
(赤外線天体の詳細な撮像・分光観測)

太陽同期軌道上のあかり衛星



¹Murakami et al. 2007

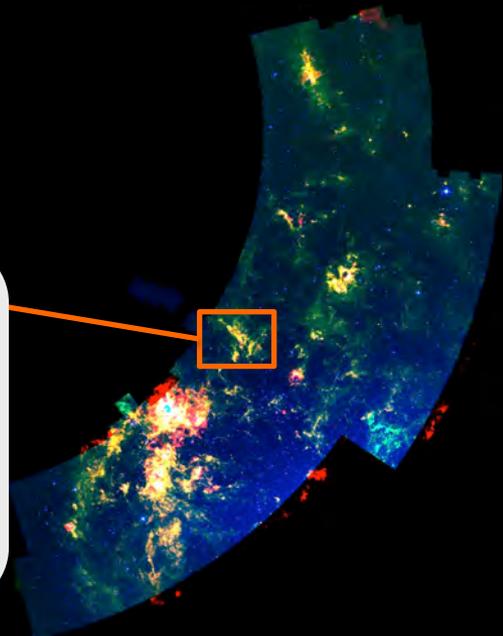
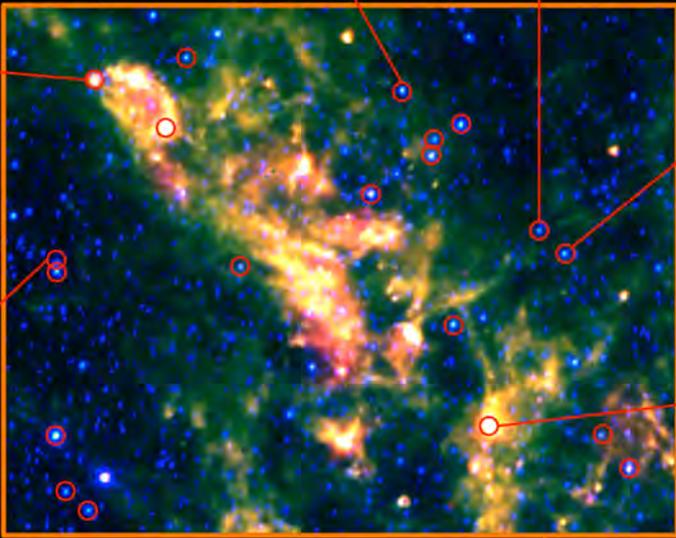
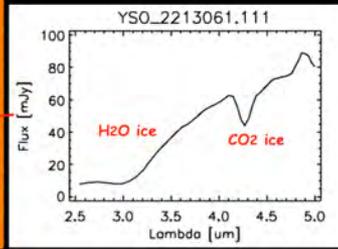
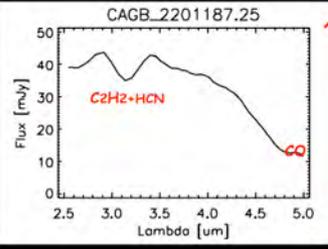
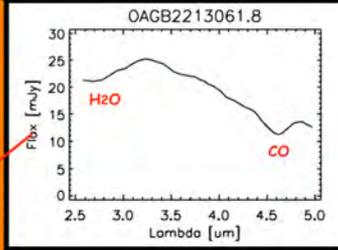
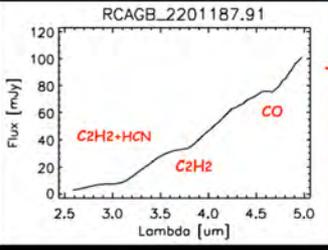
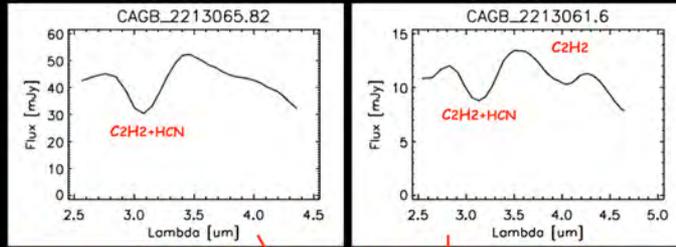
²Onaka et al. 2007

³Kawada et al. 2007

AKARI Large-area Survey of the Large Magellanic Cloud (LSLMC)

¹Ita+ 2008
²Kato+ 2012
³Shimonishi+ 2013

N148



- マルチバンド撮像(3.2, 7.0, 11, 8.0, 15, 24 μm)^{1,2}: 全70万天体
- スリットレス多天体分光(2.5–5 μm , R=15-40)³: 全1750天体
- 空間分解能: 4"~10" (1pc–2.5pc)
- 観測領域 (~10 deg², 満月50個分, 600 ポインティング)

スリットレスプリズム分光サーベイ

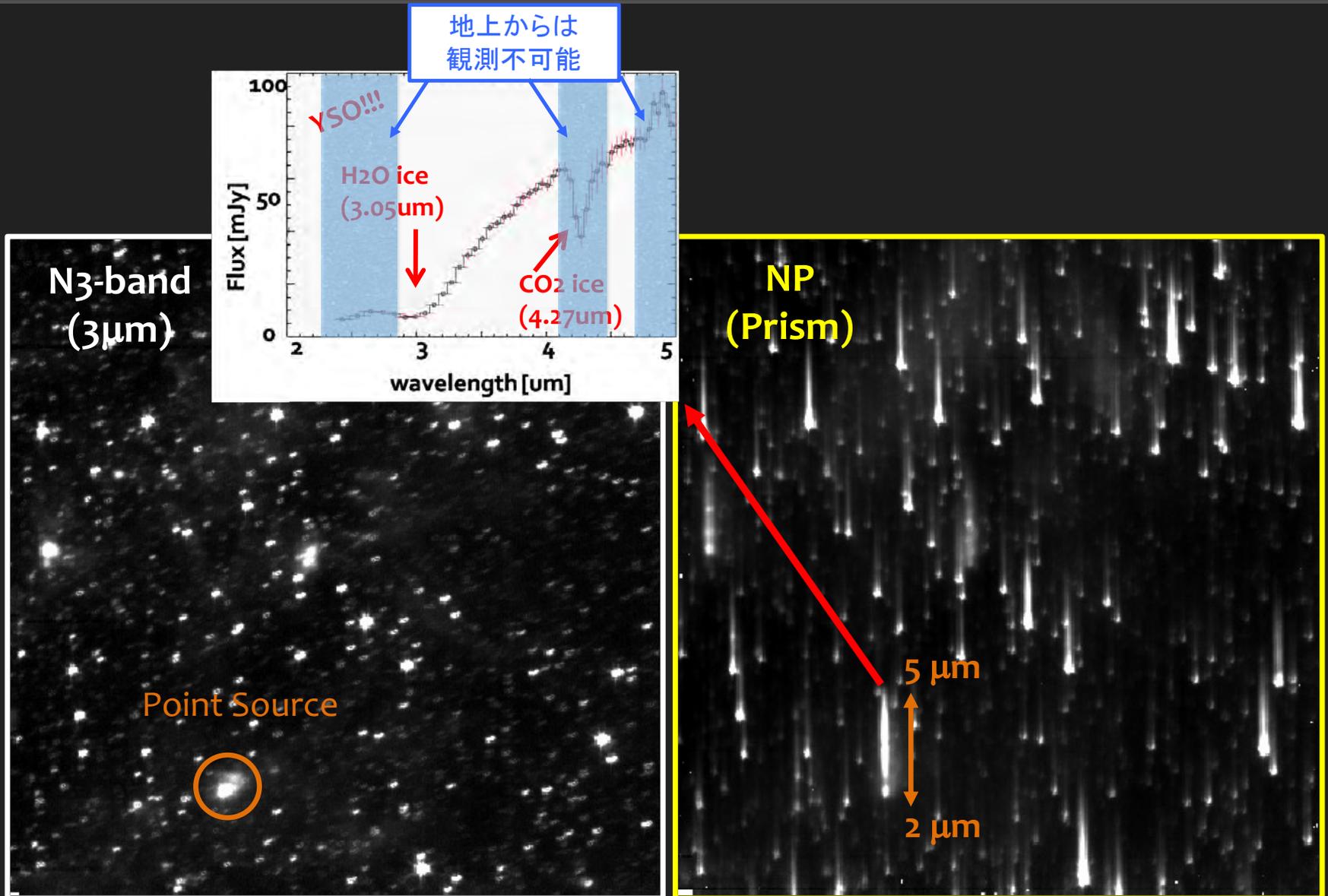


Fig.5 AKARI/IRC field-of-view and slit-less spectroscopy

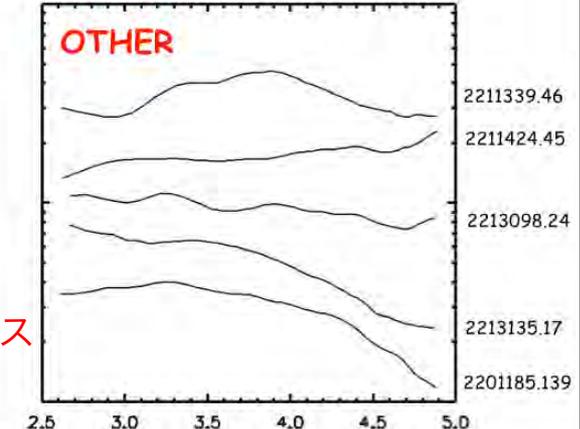
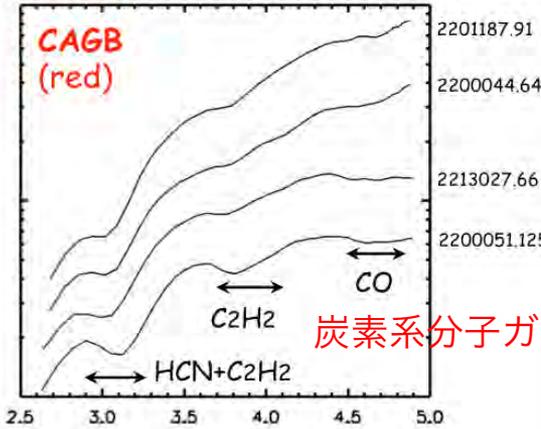
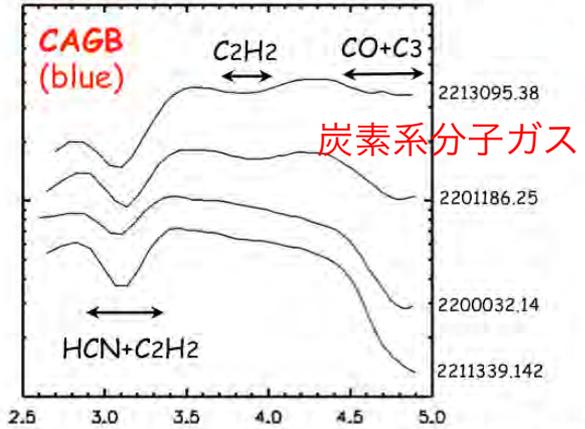
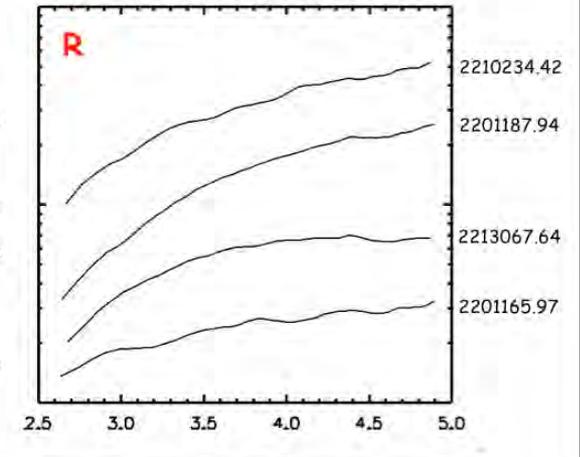
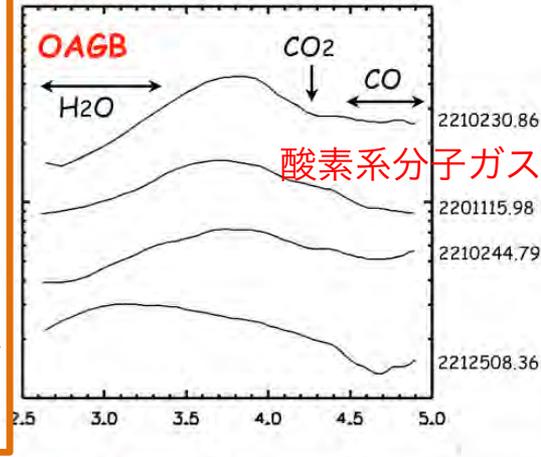
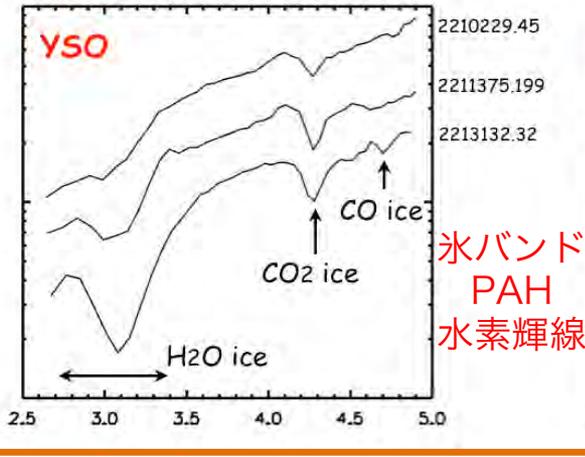
赤外線サーベイデータに含まれる様々な天体

生まれたばかりの星
(原始星)

年老いた星
(酸素星)

ただただ赤い星

log (Flux) [arbitrary unit]



Wavelength [μm]

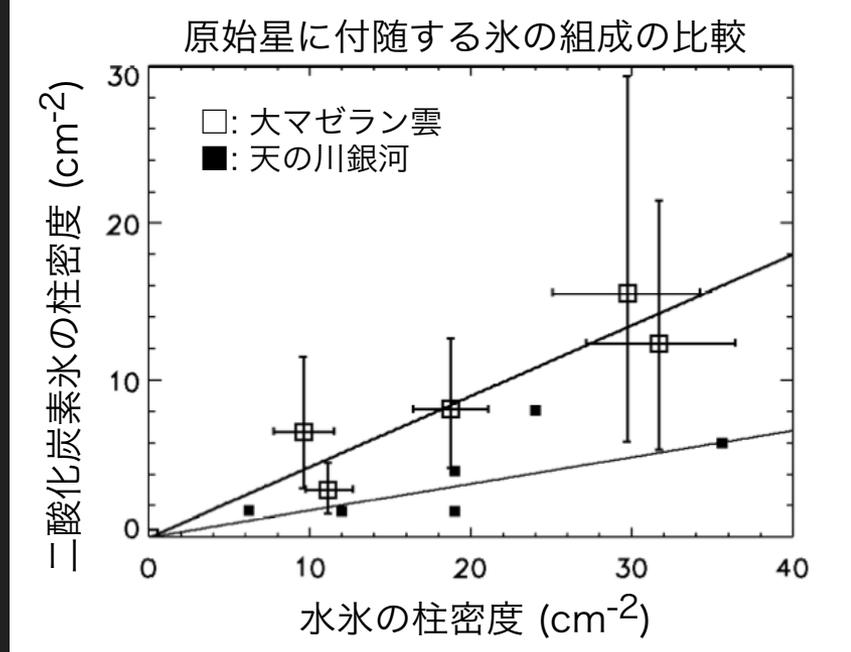
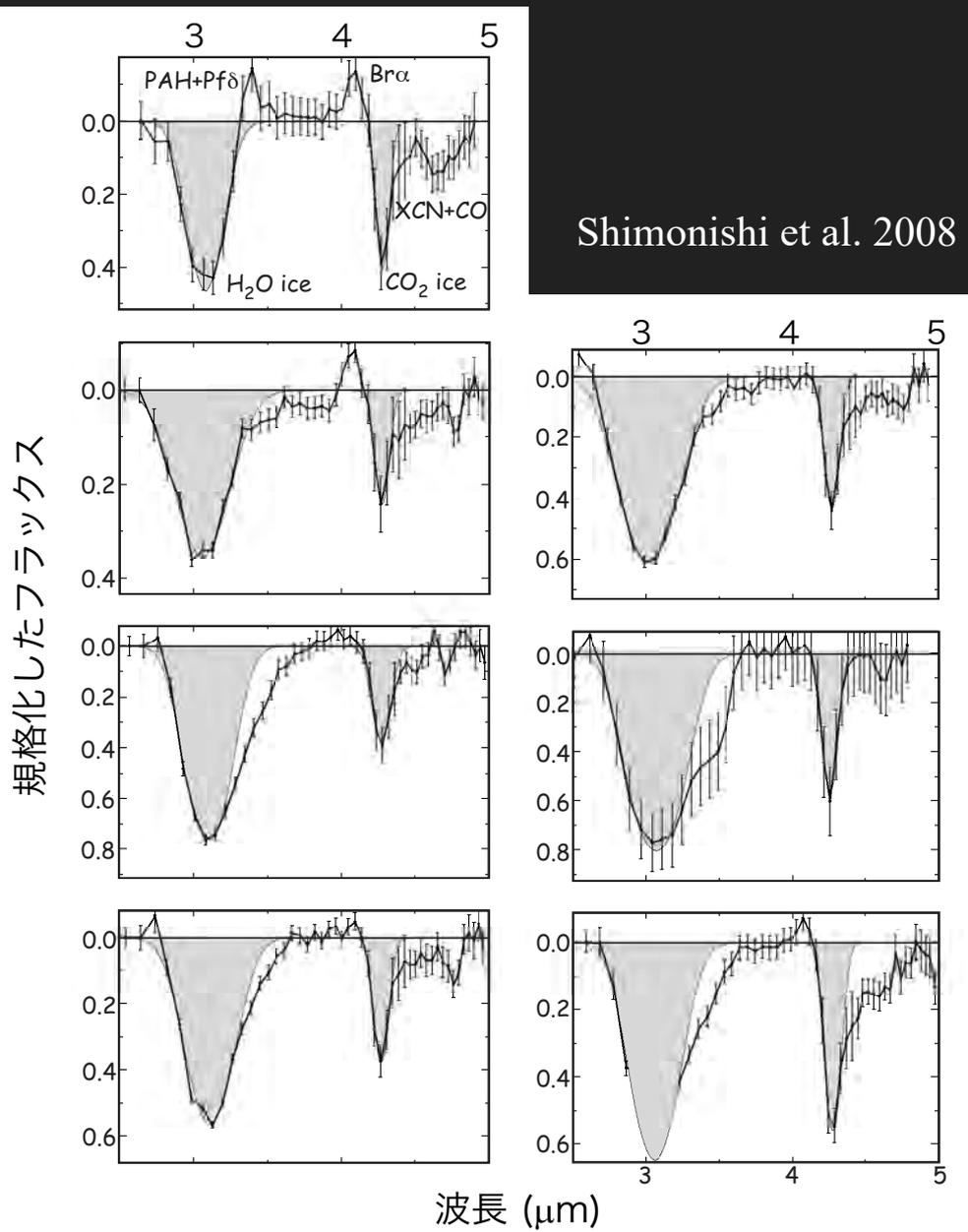
年老いた星
(炭素星)

激しい質量放出を
している炭素星

???

Fig.6 Classification of LSLMC sources based on their NIR spectra

最初の成果: 低重元素量アストロケミストリー研究の第一歩



- 系外銀河に新たな原始星を複数発見!
- 原始星付随物質の化学組成の研究を低重元素量環境に拡張!

「あかり」と地上望遠鏡の連携による詳細な追観測

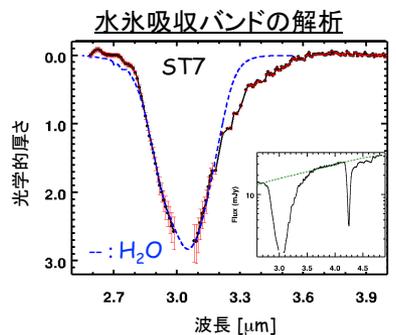
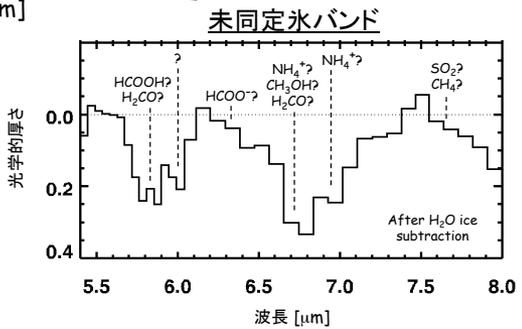
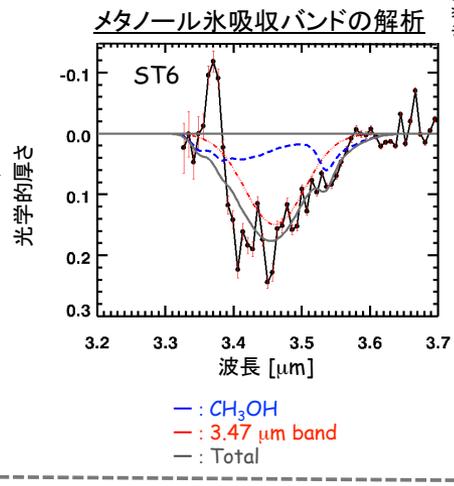
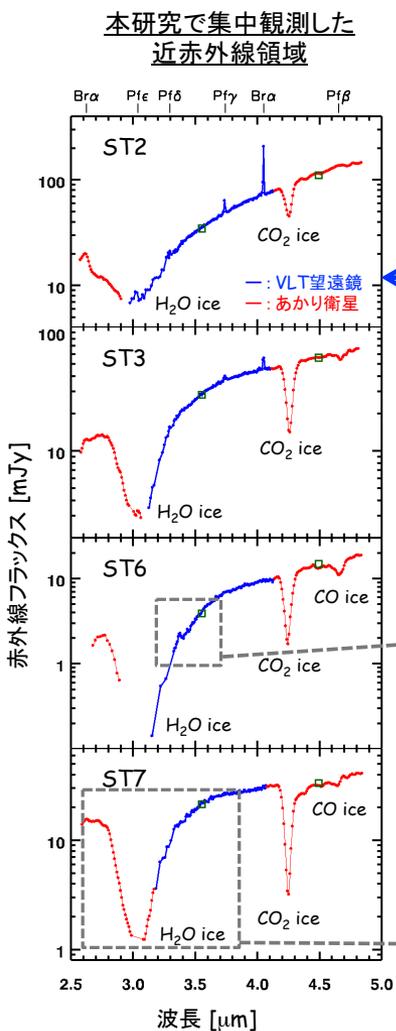
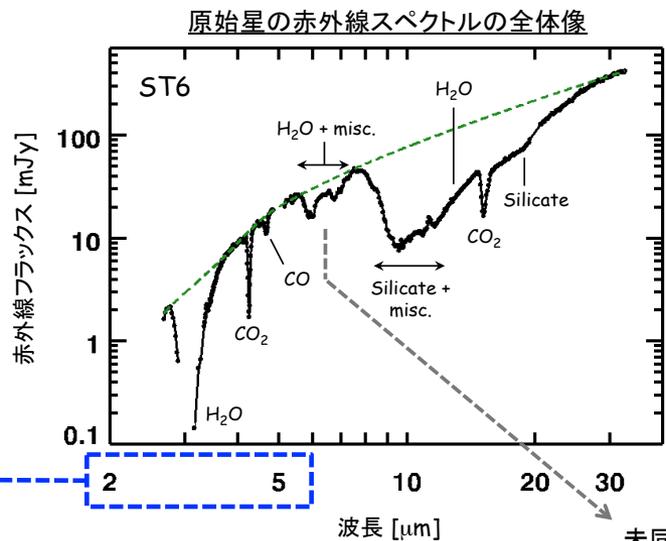
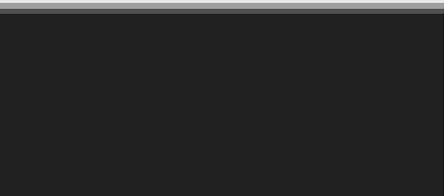
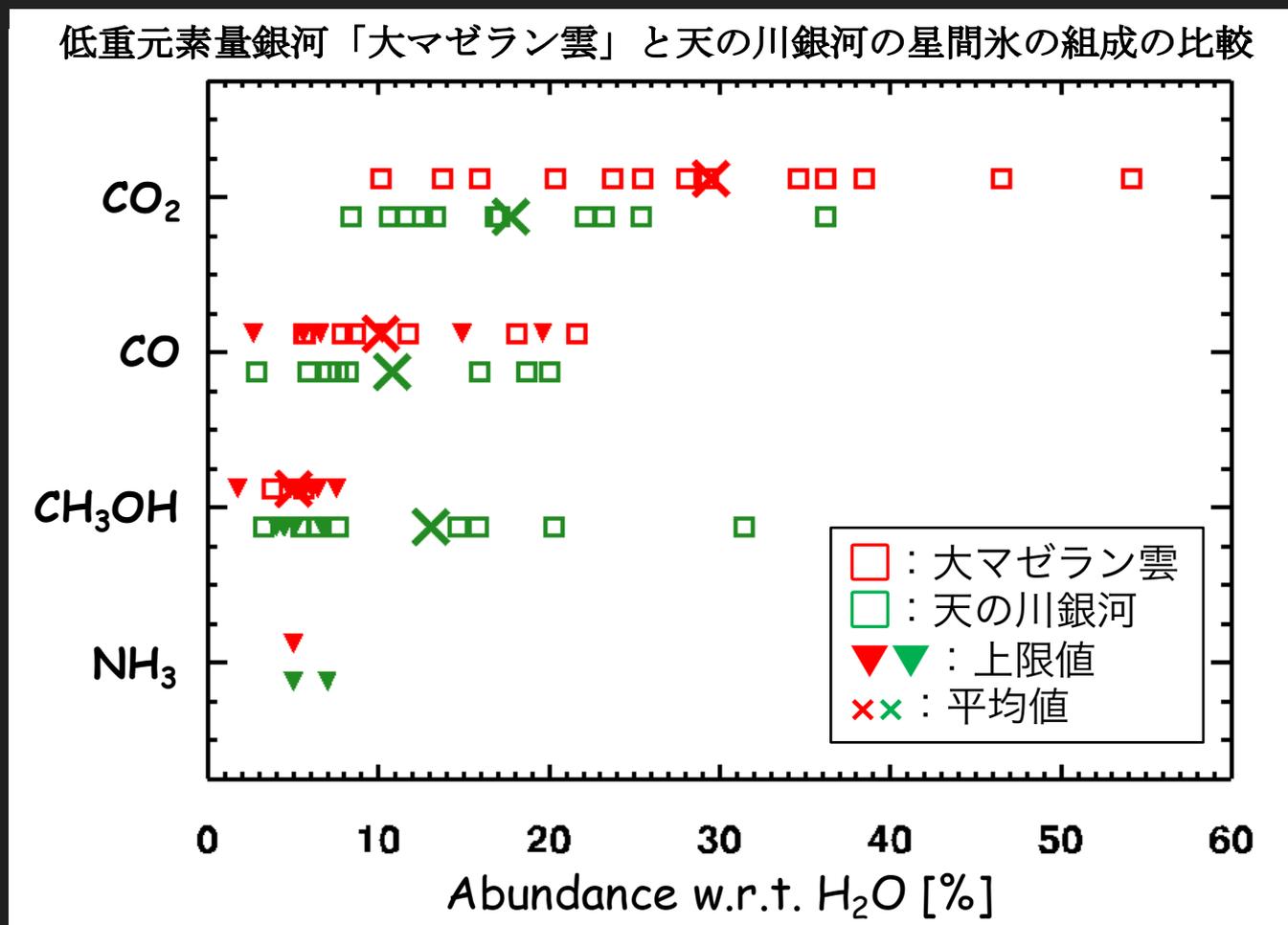


Fig.7 Analysis of near-infrared spectrum of ices around extragalactic protostars obtained [Shimonishi+ 2010, 2016a]

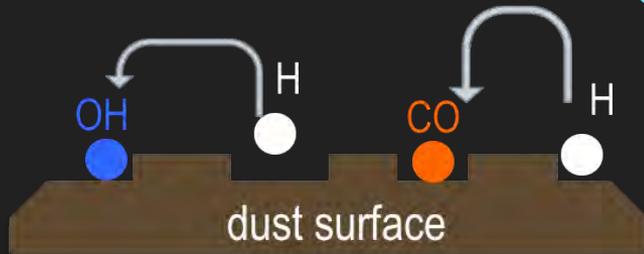
重元素量の異なる星形成領域における星間物質の化学組成の違いの発見

- 重元素量は星間物質の化学組成に影響を与える、しかし分子存在度は単純に重元素量でスケールされる関係ではない



Warm ice chemistry hypothesis (Shimonishi+ 2016a)

Low temperature ($\sim 10\text{K}$)



Moderate temperature ($< 20\text{K}$)



High temperature ($> 20\text{K}$)



金属量の低さに起因する分子雲のダスト温度の高さが、原始星付随物質の化学組成に影響を及ぼすことを提唱

ダスト(塵)表面での分子生成反応

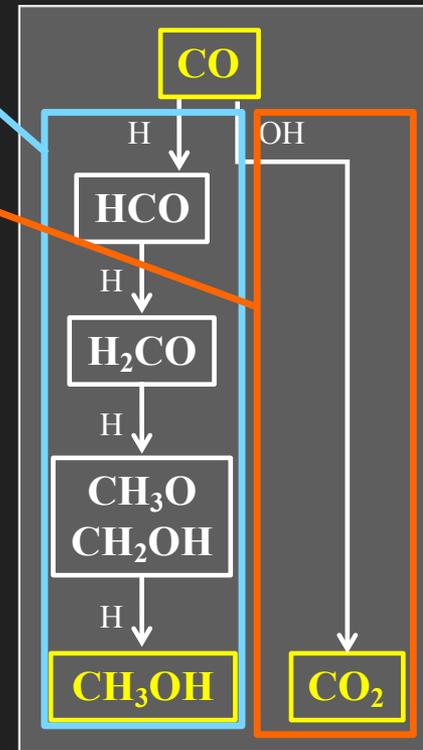


Fig.9 Up: Reaction pathway of CH_3OH and CO_2 formation on dust surface [based on Ioppolo+ 11]. Left: Concept of warm ice chemistry.

感謝 (赤外観測)



尾中さん
(当時 東京大学,
現 明星大学)



左近さん
(東京大学)



金田さん
(名古屋大学)

あかりチームの皆様
特に大山さん
(ASIAA)



加藤さん
(当時 東京大学)



河村さん
(国立天文台)



板さん
(東北大)



尾中研の先輩・後輩方 (大坪さん, 石原さん, 岡田さん, 藤原さん (国立天文台), 松本さん, 大澤さん(天文センター), 高瀬さん, 森さん) ...

低重元素量環境のアストロケミストリーの開拓

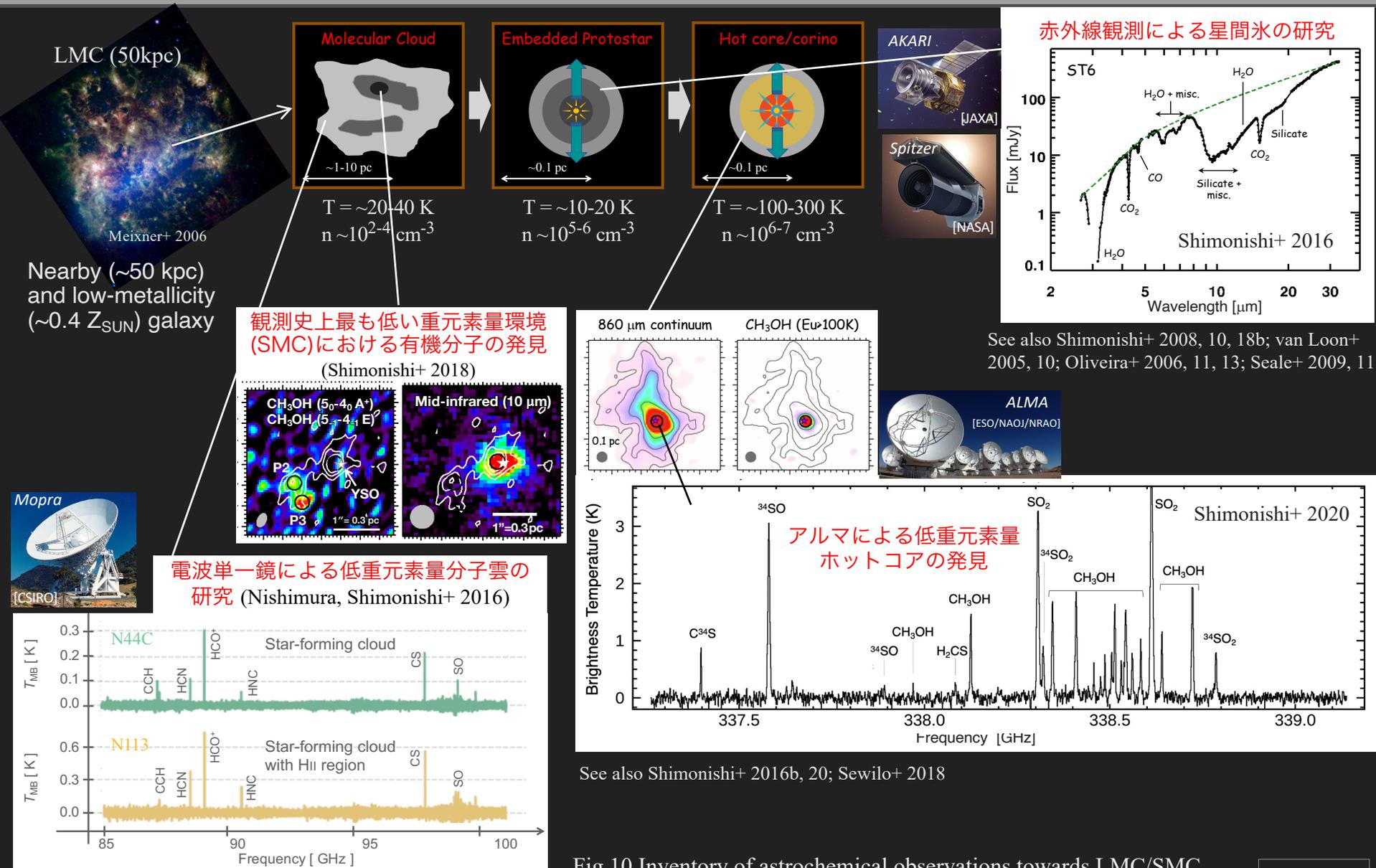


Fig.10 Inventory of astrochemical observations towards LMC/SMC

ホットコア：星間分子研究において極めて重要なターゲット

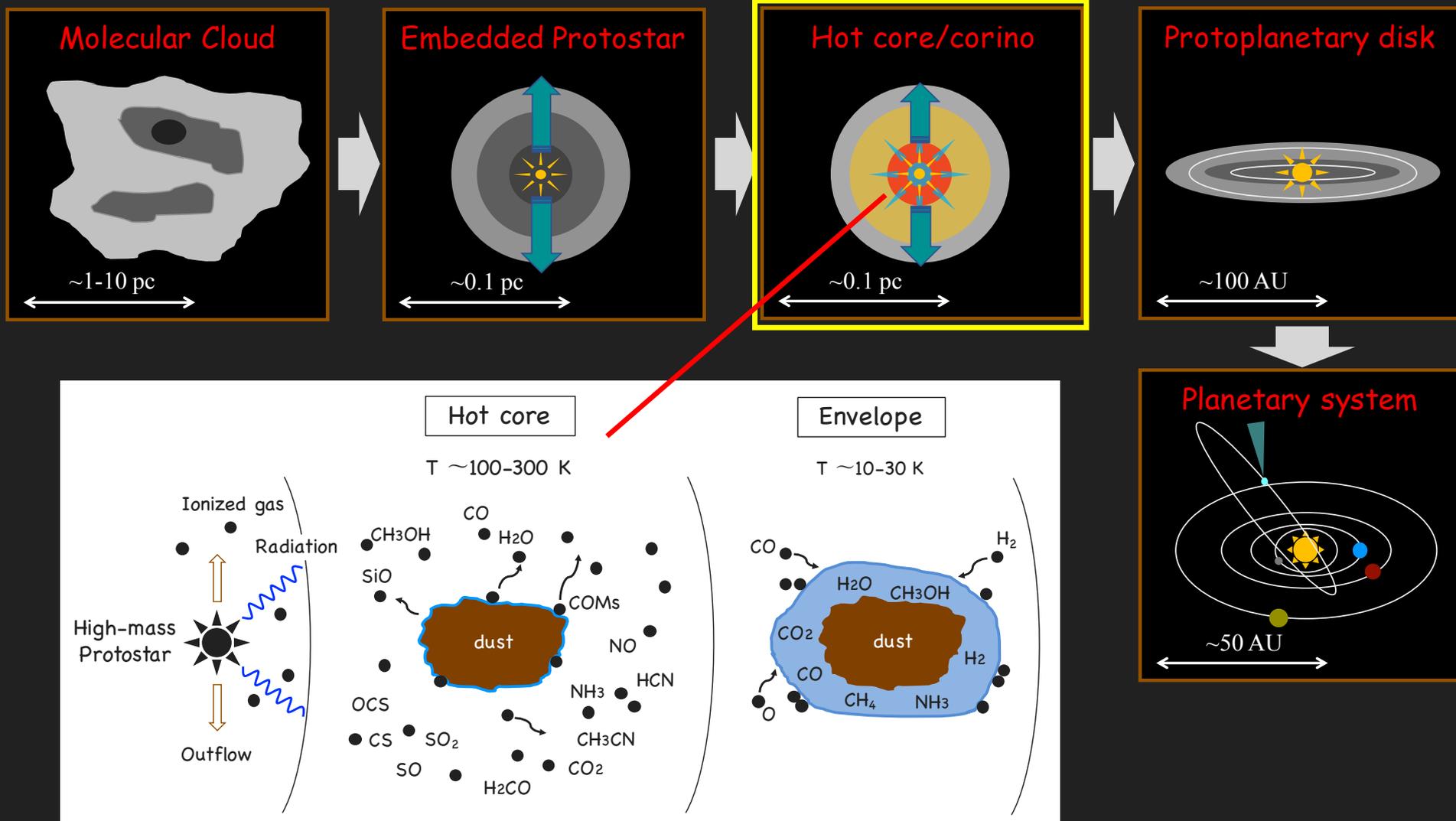


Fig.11 Schematic image of a hot molecular core

低重元素量銀河におけるホットコアの発見

- 銀河系外ホットコアは、最初の発見となる2016年以降、これまでに4例が報告されている [Shimonishi+ 2016b, 2020, Sewilo+ 2018]

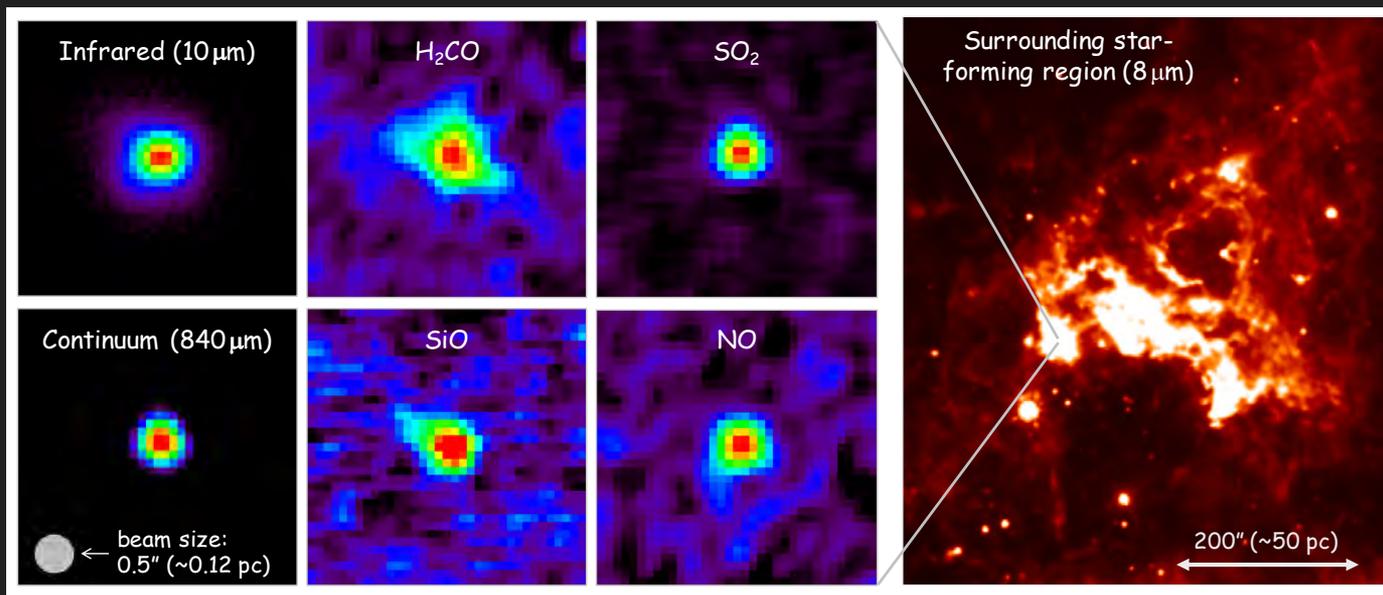
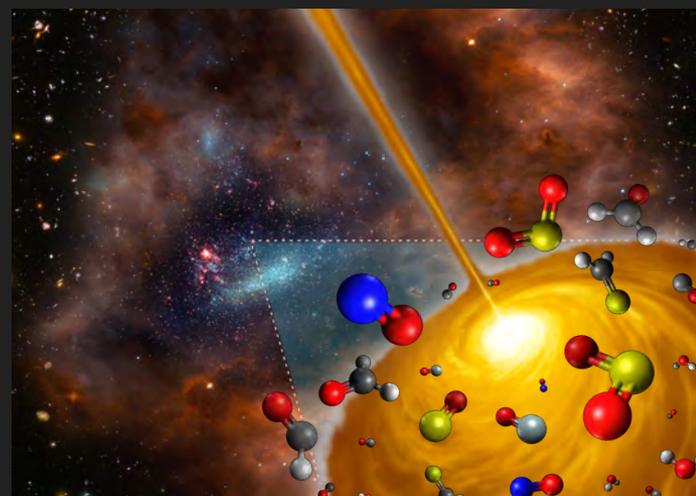
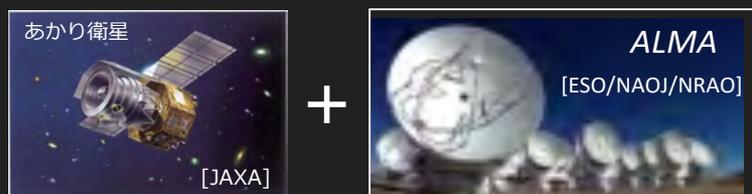
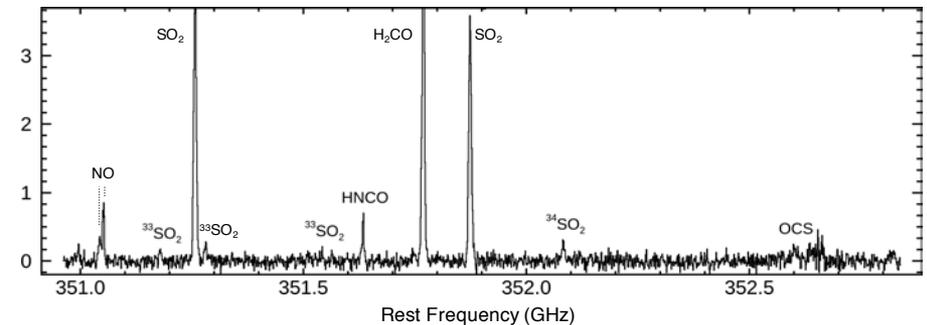
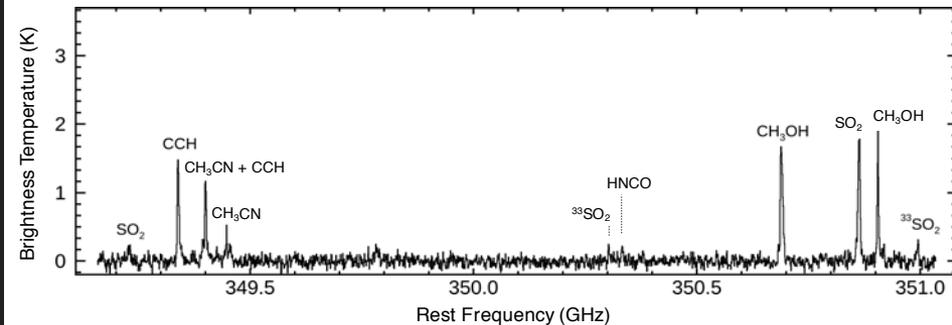
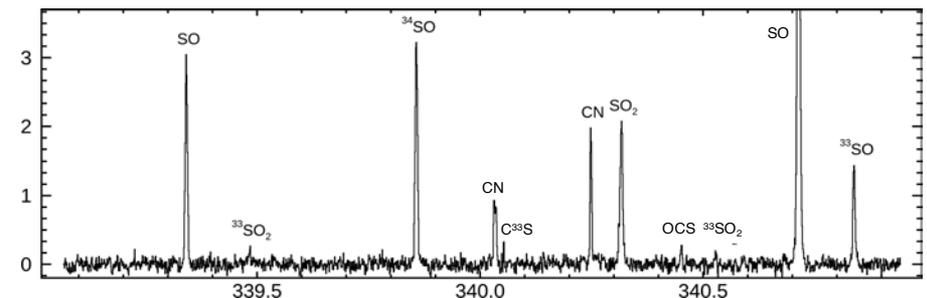
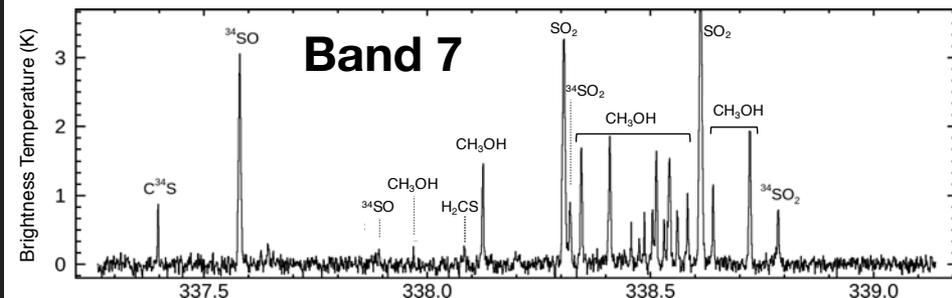
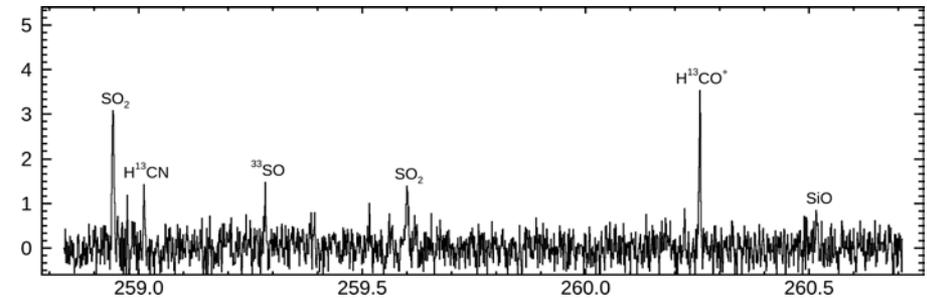
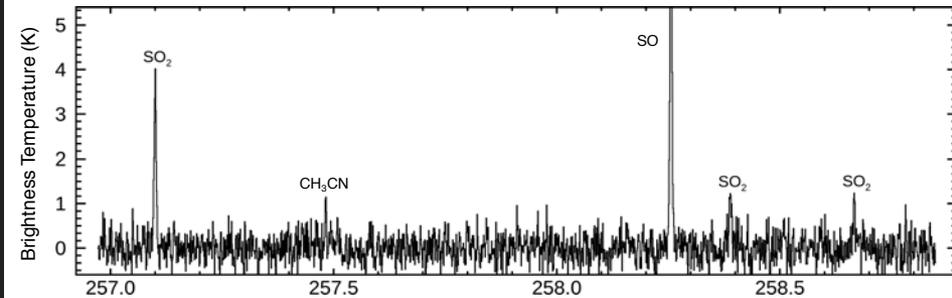
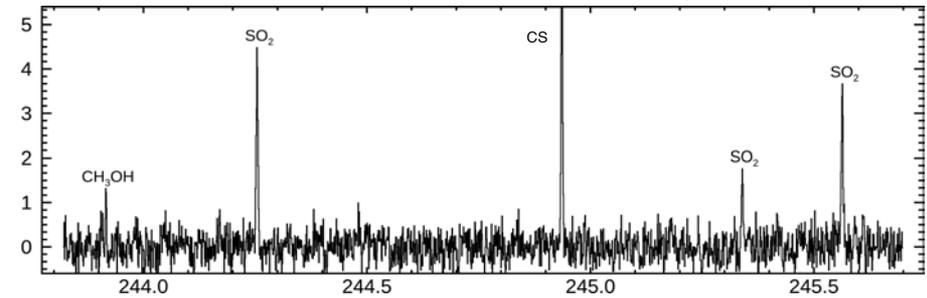
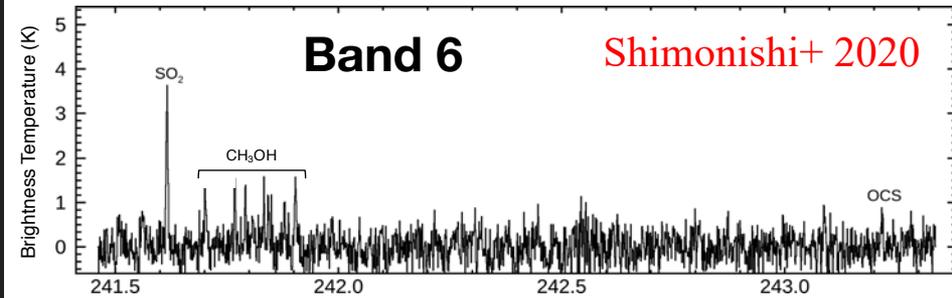


Fig.12 Up: Artist's concept image of the hot molecular core discovered in the LMC. [Credit: FRIS/Tohoku Univ.]

Fig.13 Left: ALMA observations of a hot core, ST11, in the LMC [Shimonishi+ 2016b]. Right: Spitzer $8\ \mu\text{m}$ image of a surrounding star-forming region.

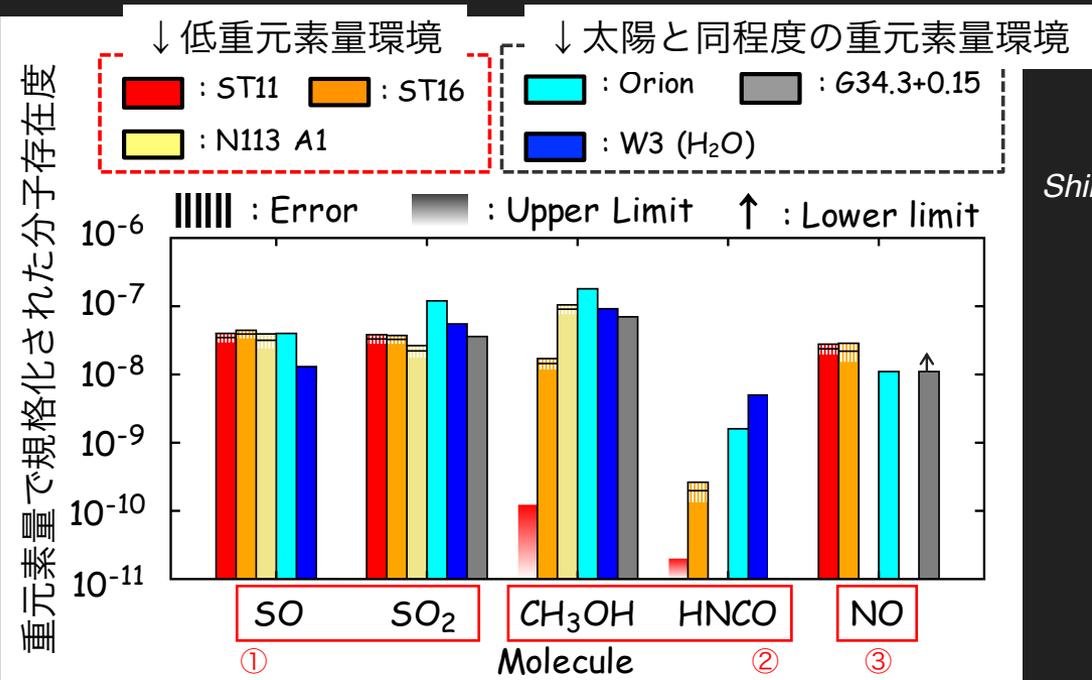
アルマ望遠鏡による低重元素量ホットコアの研究



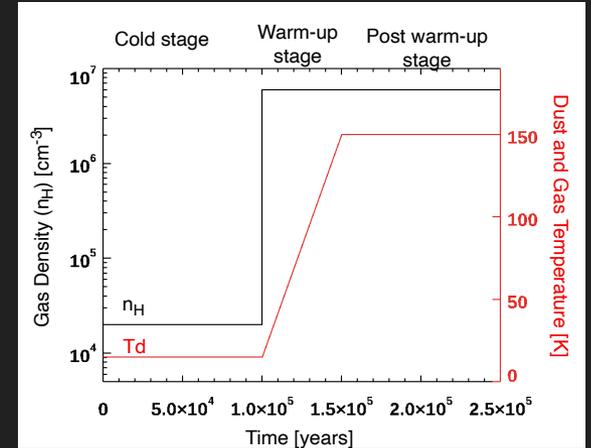
低重元素量ホットコアの化学: 星・惑星材料物質の化学的多様性に関する新たな知見

原始星付随物質の化学組成は、重元素量の増減に応じて単純にスケールされるわけではない

- ① SOやSO₂などのS系分子のように重元素量スケール則が当てはまる分子はある
- ② 一方、CH₃OHなどの有機分子は、低金属量環境において存在度に大きな多様性が見られる
- ③ 重元素が少ないのに多い分子もある (NO)



星間化学シミュレーション計算は、星ができる前の分子雲におけるダスト温度が、原始星のその後の化学進化(特に有機物)に顕著な影響を与えることを示唆。



Shimonishi, Das + 2020

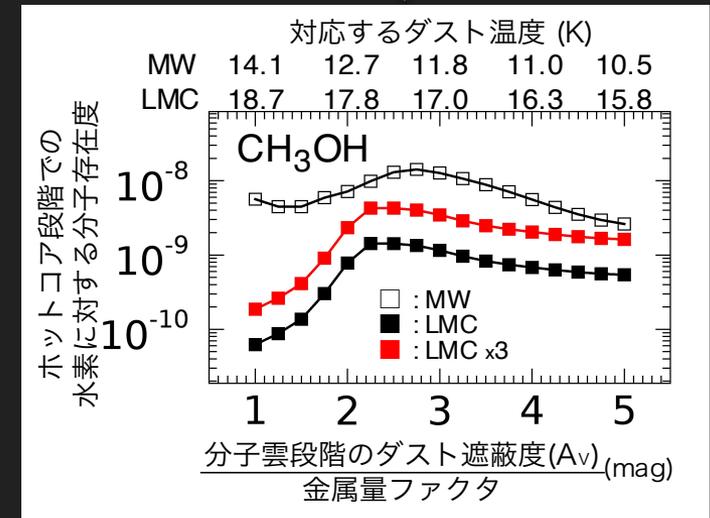


Fig.15 Comparison of molecular abundances for LMC hot cores [Shimonishi+ 2020]

感謝 (星間化学理論研究)



相川さん
(東京大学,
本賞推薦人)



Dasさん
(インド, ICSP)

昨年よりJSPS二国間
交流事業を実施中

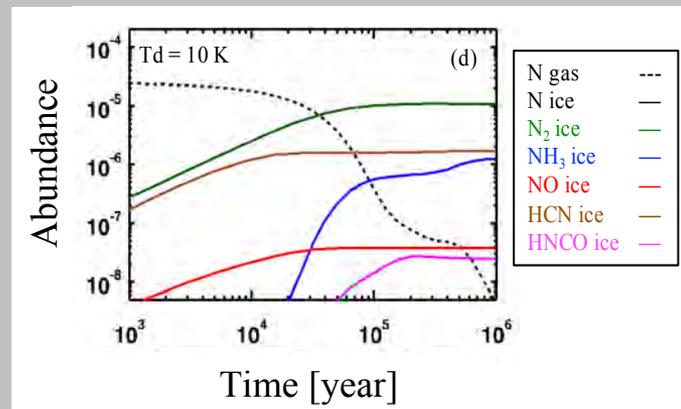
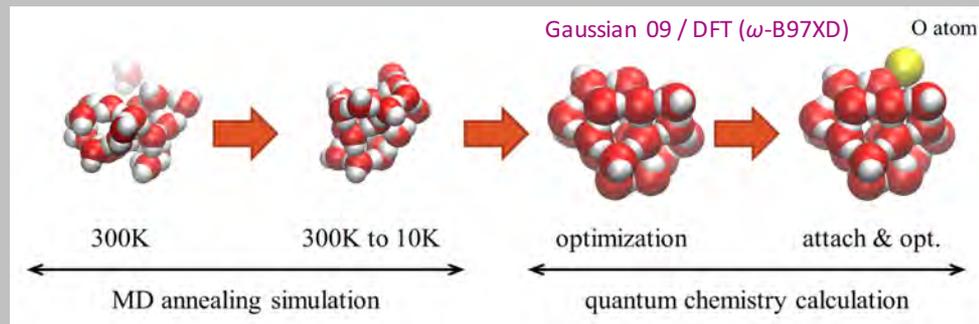
中谷さん
(東京都立大学)

古家さん
(国立天文台)

羽馬さん
(東京大学)

下西

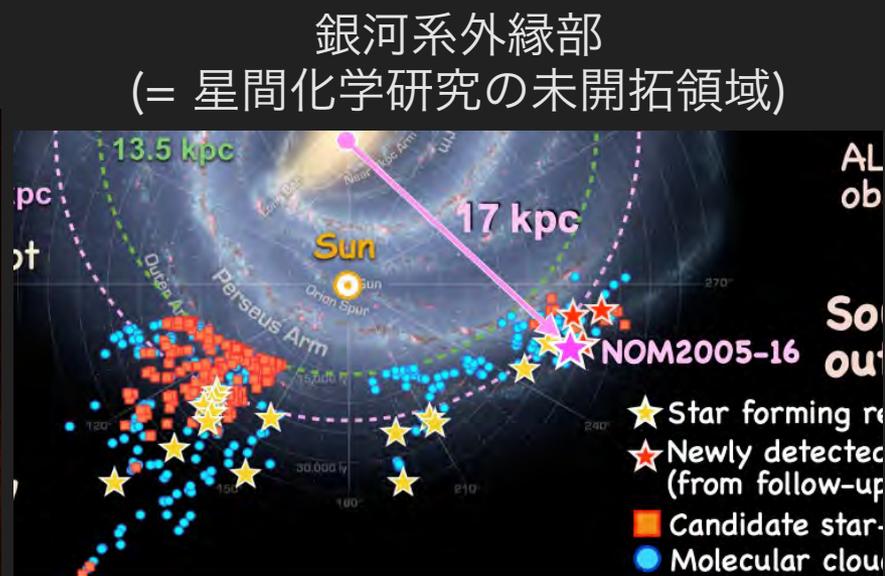
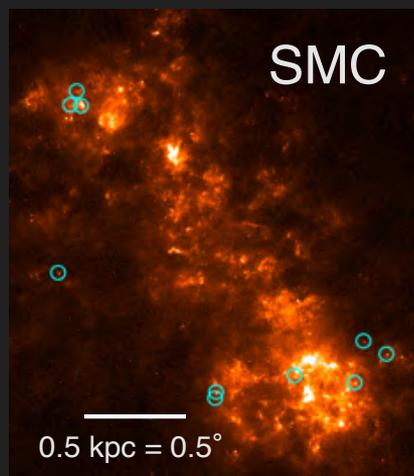
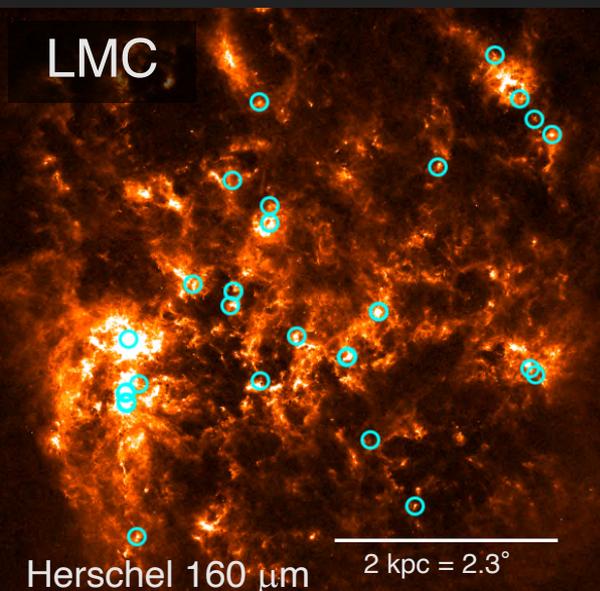
異分野連携による
星間物質表面での原子の吸着現象・
分子生成に関する理論研究



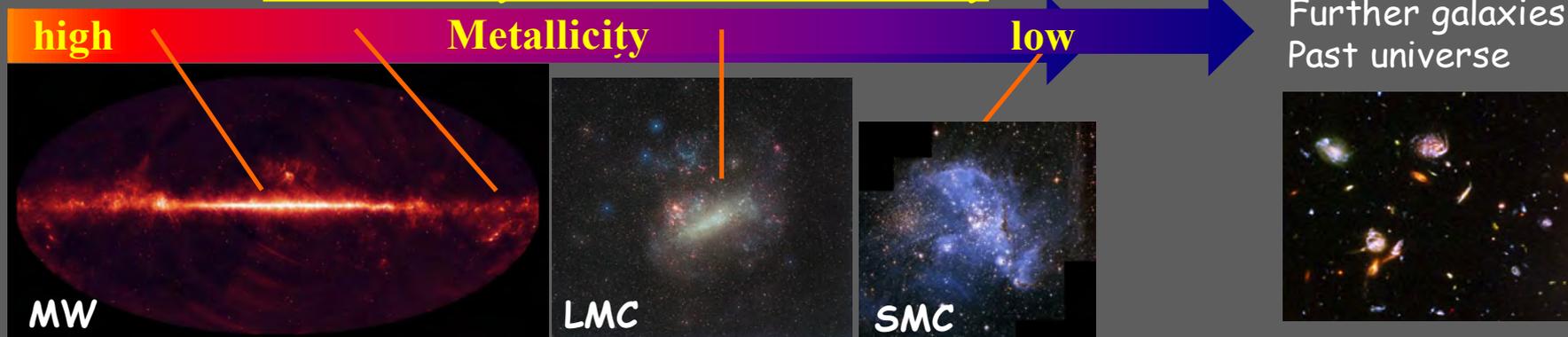
Shimonishi, Nakatani, Furuya, Hama (2018)

アルマ望遠鏡との連携による大規模なサーベイが進行中

- 大マゼラン雲・小マゼラン雲の原始星のサーベイ
(MAGellanic Outflow and chemistry Survey (MAGOS), PI: Kei Tanaka)
- 銀河系外縁部の原始星・星間分子のサーベイ



ISM chemistry as a function of metallicity



感謝 (電波観測研究他)



山本さん
(東京大学)



坂井さん
(理研)



田中さん
(コロラド大学)



安井さん
(国立天文台)

渡邊さん
(芝浦工業大学)



西村さん
(東京大学)



Y. Zhangさん
(理研)



泉さん
(ASIAA)

まとめ

- 「あかり」によるマゼラン雲の大規模赤外線サーベイ観測をきっかけに、星・惑星材料物質のアストロケミストリー研究が銀河系外へと拡張された
- 銀河の重元素量は、星間物質の化学組成に大きな影響を与えるが、分子存在度は重元素量に単純にスケールされて変わるわけではない
- 多様な重元素量環境での星形成・星間物質の統一的理解に向けて、現在も発展的なプロジェクトが進行中
- スペース赤外・地上光学観測・電波観測・数値シミュレーションなど、多くの方にサポートいただき多角的な視点で研究を行えたことは大変幸せです
- 「あかり」と共に研究できたことを心より嬉しく思います

ISM chemistry as a function of metallicity

